

СЕРГЕЕВ А. С.**ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ
ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ**

Предложен теоретический подход к обоснованию условий уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке с учетом величины удаленной части микронеровностей, оставшихся на обрабатываемой поверхности после предварительной лезвийной обработки. Установлено, что параметр шероховатости поверхности R_a при этом непрерывно уменьшается, а отношение R_{max}/R_a , наоборот, увеличивается, достигая значений 30 и более в условиях абразивного полирования. Полученные расчетные значения согласуются с экспериментальными данными. Таким образом, на основе предложенного теоретического подхода удалось определить характер изменения отношения параметров шероховатости поверхности R_{max}/R_a , которое дополняет анализ образования шероховатости поверхности при абразивной обработке, выполненный с учетом параметра R_a . Показано, что при внутреннем шлифовании параметр шероховатости поверхности R_a значительно больше, чем при абразивном полировании. Поэтому для его уменьшения предложено внутреннее шлифование осуществлять кругом с мягкой основой, например, мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Этот круг обеспечивает утопание абразивных зерен в связку и увеличение количества работающих зерен, что, как установлено экспериментально, приводит к уменьшению шероховатости поверхности при одновременном увеличении производительности обработки. В результате появляется возможность совместить операции предварительного и окончательного внутреннего абразивного шлифования в одну операцию с обеспечением требуемых (высоких) показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей. Теоретически установлено, что уменьшить параметр шероховатости поверхности R_a можно также увеличением скорости круга и уменьшением скорости поперечной подачи.

Ключевые слова: абразивное полирование, внутреннее шлифование, мягкий войлочный круг, абразивный порошок, количество работающих зерен, производительность обработки

СЕРГІЄВ О. С.**ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ**

Запропоновано теоретичний підхід до обґрунтування умов зменшення шорсткості поверхні при фінішній абразивній обробці з урахуванням величини віддаленої частини микронерівностей, що залишилися на оброблюваній поверхні після попередньої лезової обробки. Встановлено, що параметр шорсткості поверхні R_a при цьому безперервно зменшується, а відношення R_{max} / R_a , навпаки, збільшується, досягаючи значень 30 і більше в умовах абразивного полірування. Отримані розрахункові значення узгоджуються з експериментальними даними. Таким чином, на основі запропонованого теоретичного підходу вдалося визначити характер зміни відношення параметрів шорсткості поверхні R_{max} / R_a , яке доповнює аналіз утворення шорсткості поверхні при абразивній обробці, виконаний з урахуванням параметра R_a . Показано, що при внутрішньому шліфуванні параметр шорсткості поверхні R_a значно більше, ніж при абразивному поліруванні. Тому для його зменшення запропоновано внутрішнє шліфування здійснювати кругом з м'якою основою, наприклад, м'яким повстяним (фетровим) кругом з наклеєним шаром абразивного порошку 63С 20П. Цей круг забезпечує утопання абразивних зерен в зв'язку і збільшення кількості працюючих зерен, що, як встановлено експериментально, призводить до зменшення шорсткості поверхні при одночасному збільшенні продуктивності обробки. В результаті з'являється можливість поєднати операції попереднього і остаточного внутрішнього абразивного шліфування в одну операцію із забезпеченням необхідних (високих) показників шорсткості оброблюваних поверхонь. Теоретично встановлено, що зменшити параметр шорсткості поверхні можна також збільшенням швидкості круга і зменшенням швидкості поперечної подачі.

Ключові слова: абразивне полірування, внутрішнє шліфування, м'який повстяний круг, абразивний порошок, кількість працюючих зерен, продуктивність обробки.

SERHIEV ALEXANDER**SUBSTANTIATION OF EFFICIENCY OF APPLICATION OF ABRASIVE MACHINING TO REDUCE SURFACE ROUGHNESS**

A theoretical approach is proposed to justify the conditions for reducing surface roughness during finishing abrasive treatment taking into account the magnitude of the removed part of the microroughness remaining on the treated surface after preliminary blade processing. It was found that the surface roughness parameter R_a in this case continuously decreases, and the ratio R_{max} / R_a , on the contrary, increases, reaching values of 30 or more under conditions of abrasive polishing. The calculated values obtained are consistent with the experimental data. Thus, on the basis of the proposed theoretical approach, it was possible to determine the nature of the change in the ratio of surface roughness parameters R_{max} / R_a , which complements the analysis of the formation of surface roughness during abrasive processing, performed taking into account the parameter R_a . It is shown that with internal grinding, the surface roughness parameter R_a is much larger than with abrasive polishing. Therefore, to reduce it, it was proposed to carry out internal grinding with a circle with a soft base, for example, a soft felt (felt) wheel with a glued layer of abrasive powder 63C 20P. This circle ensures that abrasive grains are buried in a bundle and an increase in the number of working grains, which, as established experimentally, leads to a decrease in surface roughness while increasing processing productivity. As a result, it becomes possible to combine the operations of preliminary and final internal abrasive grinding in one operation with the provision of the required (high) roughness indices of the machined surfaces. It has been theoretically established that it is also possible to reduce the surface roughness parameter by increasing the circle speed and decreasing the lateral feed rate.

Keywords: abrasive polishing, internal grinding, soft felt wheel, abrasive powder, number of working grains, processing performance.

1. Введение. Изготовление деталей машин в современных условиях требует высококачественной обработки их поверхностей, что достигается применением эффективных финишных операций абразивной обработки. В особой мере это относится к операциям шлифования внутренних поверхностей гидро- и пневмоцилиндров, где требуется обеспечить

высокие требования шероховатости поверхности после предварительных операций лезвийной обработки. Однако, как показывает практика, выполнить эти требования на операциях внутреннего шлифования обычными абразивными кругами весьма сложно. Поэтому актуальна задача применения новых более эффективных технологий финишной

абразивной обработки внутренних поверхностей гидро- и пневмоцилиндров, обеспечивающих снижение шероховатости поверхности до требуемого уровня – не выше $R_a=0,05$ мкм. Перспективным направлением следует рассматривать применение метода внутреннего шлифования мягким войлочным (фетровым) кругом, на рабочей поверхности которого расположено большее количество абразивных зерен, чем на обычном абразивном круге. В связи с этим необходимо, прежде всего, теоретически обосновать возможности существенного уменьшения шероховатости поверхности при внутреннем шлифовании этим кругом. Это позволит совместить операции предварительного и окончательного шлифования в одну операцию, обеспечивая увеличение производительности и снижение трудоемкости обработки.

2. Анализ последних исследований и публикаций.

Вопросам снижения шероховатости поверхности при абразивной обработке в научно-технической литературе уделено довольно большое внимание. В работе [1-3] получены аналитические зависимости для определения параметров шероховатости поверхности при шлифовании с позиции теоретико-вероятностного подхода. По сравнению с традиционно применявшимся упрощенным геометрическим подходом к расчету параметров шлифования, этот подход позволяет более правильно описать взаимодействие абразивных зерен с обрабатываемым материалом и приблизить результаты расчетов к экспериментальным данным.

В работах [4, 5] приведены аналитические модели определения параметров шероховатости поверхности при абразивном полировании. При этом экспериментально установлено, что отношение параметров шероховатости поверхности R_{max}/R_a может достигать значения 30, тогда как при шлифовании оно не превышает 10. Параметр R_a принимает в этом случае значения, меньшие 0,1 мкм, чего нельзя добиться при шлифовании. Такое отличие параметров шероховатости поверхности при шлифовании и абразивном полировании свидетельствует о существовании значительных отличительных признаков в формировании шероховатости поверхности. Однако в научно-технической литературе они в достаточной степени не раскрыты. Поэтому представляется важным и актуальным, используя теоретический подход,

предложенный в работах [4, 5], провести дальнейшие исследования закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке и выявить новые технологические возможности уменьшения шероховатости при шлифовании. Иными словами, попытаться реализовать при шлифовании эффекты, связанные с уменьшением шероховатости поверхности, присущие процессу абразивного полирования, но с более высокой производительностью обработки.

3. Цель исследования. Теоретическое обоснование условий существенного уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке.

4. Изложение основного материала. Для решения поставленной задачи воспользуемся расчетной схемой определения параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке, приведенной в работе [4, 5].

На рис. 1,а приведен график изменения функции $L(y)$ – опорной длины микропрофиля обработанной поверхности по глубине y . Заштрихованным показан неудаленный с обработанной поверхности металл, оставшийся в виде микронеровностей после предварительной лезвийной обработки. За начало отсчета ($y=0$) на графике принята самая глубокая впадина микронеровностей, оставшихся после предварительной обработки. Координата $y=R_{max0}$ соответствует максимальной высоте микронеровностей на обрабатываемой поверхности.

При абразивном полировании происходит удаление оставшихся после предварительной обработки микронеровностей. В результате координата $y=R_{max0}$ через определенное время обработки переместится в положение $y=R_{max1}$. Расчетами установлено, что при упрощенном представлении на рис. 1,а функции $L(y)=tg\alpha \cdot y$ (где $tg\alpha = B/R_{max0}$; B – базовая длина обработанной поверхности, м) в виде прямой линии положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности определяется из условия $a = 0,5 \cdot R_{max0}$. Соответственно, отношение параметров шероховатости обработанной поверхности $R_{max0}/R_a=4$.

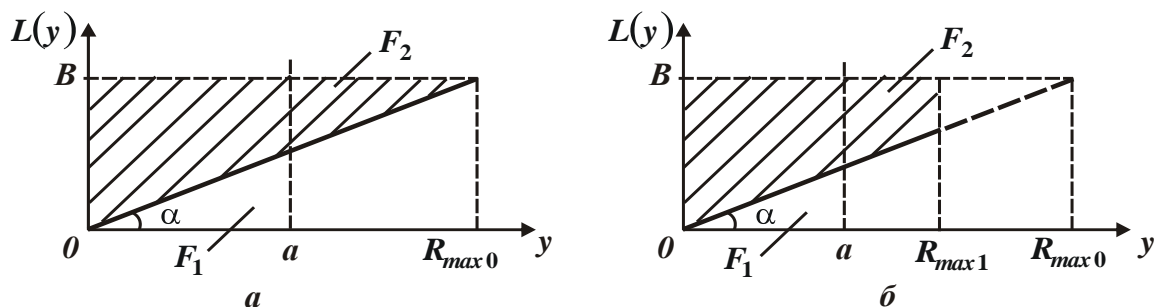


Рис. 1 – Характер изменения функции $L(y)$ по глубине микропрофиля y для исходной шероховатости поверхности (а) и после абразивной обработки (б)

При значении $y = R_{max1}$ (рис. 1,б) положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности изменится. Для его определения следует воспользоваться известным условием [4], согласно которому площади F_1 и F_2 , определяющие площади впадин и выступов на базовой длине B обработанной поверхности, равны между собой.

Исходя из рис. 1,б, имеем:

$$F_1 = \int_0^a L(y) \cdot dy = \int_0^a tg\alpha \cdot y \cdot dy = tg\alpha \cdot \frac{a^2}{2}; \quad (1)$$

$$F_2 = (R_{max1} - a) \cdot B - \int_a^{R_{max1}} L(y) \cdot dy = (R_{max1} - a) \cdot B - tg\alpha \cdot \left(\frac{R_{max1}^2}{2} - \frac{a^2}{2} \right). \quad (2)$$

Из условия $F_1 = F_2$ получено:

$$a = R_{max1} - \frac{R_{max1}^2}{2 \cdot R_{max0}}. \quad (3)$$

Тогда

$$F_1 = \frac{B \cdot R_{max1}^2}{2 \cdot R_{max0}} \cdot \left(1 - \frac{R_{max1}}{2 \cdot R_{max0}} \right)^2; \quad (4)$$

$$F_2 = \frac{B \cdot R_{max1}^2}{2 \cdot R_{max0}} \cdot \left(1 - \frac{R_{max1}}{2 \cdot R_{max0}} \right)^2. \quad (5)$$

Как видно, площади F_1 и F_2 равны между собой. Следовательно, расчеты выполнены правильно.

Таблица 1 – Расчетные значения параметра R_a при $R_{max0}=1$ мкм

R_{max1} , мкм	0	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,67	0,8	1,0
R_a , мкм	0	0,0001	0,0023	0,009	0,0324	0,065	0,102	0,176	0,2	0,23	0,25

Таблица 2 – Расчетные значения отношений R_a/R_{max1} и R_{max1}/R_a

R_{max1}/R_{max0}	0	0,005	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,67	0,8	1,0
R_a/R_{max1}	0	0,005	0,01	0,047	0,09	0,162	0,216	0,256	0,294	0,296	0,288	0,25
R_{max1}/R_a	∞	200	100	21,3	11,1	6,17	4,63	3,9	3,4	3,38	3,47	4,0

Из зависимости (7) вытекает зависимость для определения отношения параметров шероховатости поверхности R_a/R_{max1} :

$$\frac{R_a}{R_{max1}} = \frac{R_{max1}}{R_{max0}} \cdot \left(1 - \frac{R_{max1}}{2 \cdot R_{max0}} \right)^2. \quad (9)$$

В зависимости (9) отношение параметров R_{max1}/R_{max0} оказывает противоположное влияние на отношение параметров шероховатости поверхности R_a/R_{max1} . Для определения экстремального значения функции R_a/R_{max1} следует зависимость (9) подчинить необходимому условию

Параметр шероховатости поверхности R_a определяется из условия $R_a \cdot B = F_1 + F_2$ или

$$\frac{1}{2} \cdot R_a \cdot B = F_1. \quad (6)$$

С учетом зависимости (4) имеем:

$$R_a = \frac{R_{max1}^2}{R_{max0}} \cdot \left(1 - \frac{R_{max1}}{2 \cdot R_{max0}} \right)^2. \quad (7)$$

В табл. 1 приведены рассчитанные на основе зависимости (7) значения параметра R_a . Как видно, с уменьшением параметра R_{max1} в пределах $R_{max0} \dots 0$ значения R_a непрерывно уменьшаются, вплоть до нуля. Это указывает на возможность существенного уменьшения параметра R_a в условиях абразивного полирования за счет уменьшения высоты микронеровностей исходной шероховатости. Данная закономерность, по сути, и определяет эффективность применения на практике абразивного полирования. В этих условиях расчет параметра R_a можно производить по упрощенной зависимости (7):

$$R_a = \frac{R_{max1}^2}{R_{max0}}. \quad (8)$$

Уменьшение параметра R_a с уменьшением параметра R_{max1} связано с уменьшением площадей F_1 и F_2 . В результате площадь $(a \cdot B - F_1)$ незначительно отличается от площади $a \cdot B$ (рис. 1,б) и параметр $R_a \rightarrow 0$ согласно зависимости (6).

экстремума: первая производная функции R_a/R_{max1} от отношения R_{max1}/R_{max0} равна нулю. Используя это условие, получено: $R_a/R_{max1}=0,67$.

Расчетами установлено, что в точке экстремума вторая производная функции R_a/R_{max1} по величине R_{max1}/R_{max0} принимает отрицательное значение. Это указывает на то, что в точке экстремума функция принимает максимальное значение.

В табл. 2 приведены расчетные значения отношения R_a/R_{max1} , которые подтверждают правильность аналитического решения. В диапазоне

изменения $R_{max1}/R_{max0}=0,4...1,0$ отношение R_a/R_{max1} изменяется незначительно, а с уменьшением значений $R_{max1}/R_{max0}=0,1...0,01$ оно принимает весьма малые значения – $R_a/R_{max1}=0,1...0,01$. Соответственно, отношение $R_{max1}/R_a = 10...100$.

Как видно, в этом случае отношения R_{max1}/R_{max0} и R_a/R_{max1} фактически равны между собой. Этим объясняются экспериментальные данные, приведенные в работе [4], согласно которым при абразивном полировании отношение R_{max1}/R_a достигает значения 30 и более. В результате фактически полностью устраняется исходная шероховатость и на обработанной поверхности образуется шероховатость, сформированная непосредственно в процессе абразивного полирования.

При шлифовании отношение R_{max1}/R_a , как правило, не превышает значение 10. Исходя из табл. 2, это указывает на то, что процесс шлифования осуществляется при изменении отношения $R_{max1}/R_{max0} = 0,1...1$, тогда как процесс абразивного полирования осуществляется при изменении отношения $R_{max1}/R_{max0} = 0,01...0,1$, т. е. в весьма малом диапазоне.

Таким образом, на основе предложенного теоретического подхода удалось определить характер изменения отношения R_a/R_{max1} , которое дополняет анализ образования шероховатости поверхности при абразивной обработке с помощью параметра R_a .

Для более полного анализа закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке следует рассмотреть аналитическую зависимость для определения параметра R_a , приведенную в работе [6]:

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n}, \quad (10)$$

где γ – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна; $n = k \cdot B \cdot l$ – количество абразивных зерен, принимающих участие в процессе образования шероховатости поверхности; k – поверхностная концентрация абразивных зерен, шт./м²; l – длина контакта абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, м.

Окончательно зависимость (10) принимает вид:

$$R_a = \frac{0,367}{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot l}. \quad (11)$$

Как следует из зависимости (11), уменьшить параметр R_a можно за счет увеличения двух параметров: k и l . Увеличение l при внутреннем шлифовании предполагает увеличение длины контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Для этого можно использовать схему внутреннего шлифования, устанавливая ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом

перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 2 [7]).



Рис. 2 – Схема обработки отверстия в цилиндре

Это позволяет в несколько раз увеличить длину контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью и изменить направление образования рисок от проработавших зерен. Они будут образовываться фактически вдоль обрабатываемой поверхности, что положительно отразится на работоспособности пневмо- и гидроцилиндров.

Увеличить поверхностную концентрацию абразивных зерен k на рабочей поверхности шлифовального круга можно за счет применения круга с мягкой основой, например, мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [7]. В этом случае под действием нагрузки абразивные зерна «утапают» в связку и в процессе резания участвует большее их количество, что способствует увеличению параметра k . Применение этого круга позволяет одновременно увеличить параметры k и l , что приводит к уменьшению параметра R_a до значения 0,04 мкм, чего невозможно достичь при внутреннем шлифовании обычными абразивными кругами.

Полученное небольшое значение параметра шероховатости поверхности R_a соответствует аналогичным значениям R_a , полученным при абразивном полировании. Однако при внутреннем шлифовании достигается более высокая производительность обработки, что позволяет совместить операции предварительного и окончательного внутреннего абразивного шлифования в одну операцию с обеспечением требуемых (высоких) показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей. Следовательно, основным фактором, влияющим на достижение высоких показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей при абразивной обработке необходимо рассматривать количество работающих зерен n . С их увеличением ($n = k \cdot B \cdot l$) за счет увеличения параметров k и l параметр шероховатости поверхности R_a уменьшается и может принимать весьма малые значения.

Для установления связи количества работающих зерен n со скоростью поперечной подачи шлифовального круга $S_{\text{поп}}$ необходимо представить $l = V \cdot \tau$, где V – скорость резания, м/с;

$\tau = R_{max1} / S_{non}$ – время перемещения шлифовального круга в радиальном направлении на величину R_{max1} , с.

Параметр шероховатости поверхности R_{max1} следует выразить через известное отношение R_{max1} / R_a , расчетные значения которого приведены в табл. 2:

$$R_{max1} = \left(\frac{R_{max1}}{R_a} \right) \cdot R_a. \quad (12)$$

Подставляя приведенные выше выражения в зависимость (11), получено:

$$R_a = \frac{0,367 \cdot S_{non}}{tg\gamma \cdot k \cdot V \cdot \left(\frac{R_{max1}}{R_a} \right) \cdot R_a},$$

откуда

$$R_a = \sqrt{\frac{0,367 \cdot S_{non}}{tg\gamma \cdot k \cdot V \cdot \left(\frac{R_{max1}}{R_a} \right)}}. \quad (13)$$

Значение отношения R_{max1} / R_a необходимо применять таким, чтобы установленное по зависимости (13) значение R_a соответствовало ему согласно табл. 2. В этом случае расчет параметра R_a будет выполнен правильно.

Исходя из зависимости (13), параметр R_a в меньшей степени изменяется с изменением параметров процесса шлифования, чем в зависимости (11).

Уменьшить параметр R_a можно увеличением параметров k , V и отношения R_{max1} / R_a , которое согласно табл. 2 тем больше, чем меньше параметр шероховатости поверхности R_{max1} . Из этого вытекает, что, осуществляя процесс полирования, для которого отношение R_{max1} / R_a принимает относительно большие значения, можно добиться существенного уменьшения параметра R_a . Кроме того, уменьшению параметра R_a при абразивном полировании способствует также уменьшение скорости поперечной подачи S_{non} . При обычном абразивном шлифовании S_{non} больше, чем при абразивном полировании, а отношение R_{max1} / R_a , входящее в зависимость (13), наоборот, меньше. Это предопределяет более высокие значения параметра R_a при абразивном шлифовании. Поэтому в этих условиях эффективно применение указанного выше круга с мягкой основой, например, мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [7]. Для него отношение R_{max1} / R_a будет больше, а, соответственно, будет меньше параметр R_a даже при увеличенных значениях S_{non} , т.е. при увеличенной производительности обработки.

Выводы. В работе теоретически обоснованы условия уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке с учетом величины удаленной части микронеровностей, оставшихся на обрабатываемой поверхности после предварительной лезвийной обработки. Установлено, что параметр шероховатости поверхности R_a при этом непрерывно уменьшается, а отношение R_{max1} / R_a , наоборот, увеличивается, достигая значений 30 и более в условиях абразивного полирования. Полученные расчетные значения согласуются с экспериментальными данными. Показано, что при внутреннем шлифовании параметр шероховатости поверхности R_a значительно больше, чем при абразивном полировании. Для его уменьшения предложено внутреннее шлифование осуществлять кругом с мягкой основой, например, мягким войлочным (фетровым) кругом с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П, обеспечивающим увеличение количества работающих зерен и уменьшение шероховатости поверхности.

Список литературы:

1. Novoselov, Yu.K.: Dynamics of surface shaping in abrasive processing (LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland, P.317 (2017).
2. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. А. Королев. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 212 с.
3. Федосеев О. Б. Шлифование синтетическими сверхтвердыми материалами / О. Б. Федосеев // Изв-я высш. учебн. заведений / Машиностроение. – 1977. – № 5. – С. 104–106.
4. Новіков Ф. В. Основи обробки металевих виробів з оптичними властивостями: монографія / Ф. В. Новіков, В. Г. Шкурупій. – Харків: Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 388 с. Новіков Ф. В. Оптимальные решения в технологии машиностроения : монография / Ф. В. Новіков, В. А. Жовтобрюх, В. Г. Шкурупій. – Д. : ЛІРА, 2018. – 424 с.
5. Сергеев А. С. Повышение качества обработки при шлифовании путем уменьшения шероховатости поверхности / А. С. Сергеев, С. А. Дитиненко, Ф. В. Новіков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії // Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – № 12(1337), 2019. – С. 70–75.
6. Сергеев А. С. Высокоэффективная технология внутреннего шлифования отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції, присвяченої 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском, 20–22 листопада 2019 р., Харків. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – С. 144–145.

References (transliterated)

1. Novoselov, Yu. K.: Dynamics of surface shaping in abrasive processing (LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland, 317 (2017)
2. Korolev A.V. Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke

[Investigation of the processes of formation of tool surfaces and parts during abrasive processing]. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta. 212. (1975).

3. Fedoseyev O. B. *Shlifovaniye sinteticheskimi sverkh-tverdymi materialami* [Grinding with synthetic super-hard materials] // *Izv-ya vyssh. uchebn. zavedeniy / Mashinostroyeniye*, 5. 104–106 (1977).

4. Novikov F. V., Shkurupiy V. H. *Osnovy obrobky metalevykh vyrobiv z optychnymi vlastyvostyamy* [Fundamentals of processing of metal products with optical properties]: monohrafiya. – Kharkiv: Vyd. Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics. 388 (2015)

5. Novikov F. V., Zhovtobryukh V. A., Shkurupiy V. G. *Optimal'nyye resheniya v tekhnologii mashinostroyeniya* [Optimal solutions in engineering technology]: monografiya. – Dnepr: LIRA. 424 (2018).

6. Sergeyev A. S., Ditinenko S. A., Novikov F. V. *Povysheniye kachestva obrabotki pri shlifovanii putem umen'sheniya sherokhovatosti poverkhnosti* [Improving the quality of processing during grinding by reducing surface roughness] // *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: *Innovatsiyni tekhnolohiyi ta obladnannya obrobky materialiv u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovative technologies

and equipment handling materials in mechanical engineering and metallurgy]: zbirnyk naukovykh prats' / National Technical University "KhPI". – Kharkiv: NTU "KhPI". 12(1337). 70–75 (2019).

7. Sergeyev A. S. *Vysokoeffektivnaya tekhnologiya vnutrennego shlifovaniya otverstiy v pnevmo- i gidrotsilindrakh* [Highly efficient internal grinding of holes in pneumatic and hydraulic cylinders] // *Resursozberezhennya ta enerhoefektyvnist' protsesiv i obladnannya obrobky tyskom u mashynobuduvanni ta metalurhiyi* [Resource saving and energy efficiency of processes and equipment of pressure treatment in mechanical engineering and metallurgy]: materialy XI Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi, prysvyachenoyi 90-richchyu zasnuvannya kafedry obrobky metaliv tyskom. – Kharkiv: NTU «KHPI». 144-145 (2019).

Поступила (received) 14.05.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Сергеев Александр Сергійович (Сергеев Александр Сергеевич, Serhieiev Alexander) – аспірант кафедри «Технологія машинобудування», ДВНЗ «ПДТУ», м. Маріуполь; тел.: +38-068-78-08-555; e-mail: andilahayaa@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8974-9872>